

DETERMINACIÓN DE LOS TENSORES DE ESFUERZOS ACTUALES PARA EL SEGMENTO NORTE DE LOS ANDES CALCULADOS A PARTIR DE MECANISMOS FOCALES DE SISMOS MAYORES

Toro, R. A.¹; Osorio, J. A.¹

RESUMEN

La esquina noroccidental de Suramérica presenta un contexto geodinámico complejo debido a la interacción de las placas Nazca, Caribe y Sur América con el Bloque Andino, esta interacción se considera la responsable del campo de esfuerzos actual y por consiguiente de las estructuras tectónicas que lo afectan, así como también de la actividad sísmica asociada. Inversiones de mecanismos focales de sismos mayores dentro del Bloque Andino muestran un estado de esfuerzos compresivo, donde la dirección del esfuerzo máximo varía con relación a la margen pacífica continental desde WSW-ENE al norte de 5° N a W-E al sur de esta latitud. Esta dirección varía debido a que el vector de desplazamiento de la placa Nazca se particiona con respecto a la orientación de la fosa Colombo - Ecuatoriana en dos vectores, uno normal a la margen (vector de deformación) el otro paralelo a la margen (vector de desplazamiento), ambos vectores son transferidos al continente favoreciendo la reactivación de los sistemas de fallas paralelas a los Andes. Es así como al sur de 5°N es favorecido el movimiento de fallas laterales derechas (fallas: Romeral sur y Algeciras) y al norte de esta latitud laterales izquierda (fallas: Romeral norte, Murindo y salinas). Este régimen de esfuerzos también facilita la generación de sistemas transpresivos de dirección NEE como las fallas Garrapatas, Cucuana e Ibagué.

Palabras claves: inversión, factor de forma del tensor, régimen de esfuerzos, particionamiento, Andes del norte.

DETERMINATION PRESENT STRESS TENSOR FOR THE NORTH SEGMENT OF THE ANDES FROM FOCAL MECHANICS MAJOR EARTHQUAKES

ABSTRACT

The northwestern corner of South America presents a complex geodynamic setting due to the interaction of the Nazca, Caribbean and South American plates with the Andean Block. This interaction has been considered as responsible of the current stress state of the Northern Andes, the tectonic setting and the seismic activity. Inversion of focal mechanisms solutions of major earthquakes, shown a compressive stress state. However, the maximum stress varied along the South American margin from WSW-ENE north of 5° N to W-E south of this latitude. We propose that variation of the maximum stress is due to the partitioning of the convergence vector of the Nazca plate with respect to the orientation the Colombia-Ecuadorian trench. We divided this vector into two components. One parallel to the trench (displacement vector) and the other orthogonal to the trench (deformation vector), which is associated to the seismic activity in the coupling zone. These two vectors are transferred to the continent and favor reactivation of fault systems parallel to the Andes. Therefore, north of 5° N left lateral displacement along the faults is expected (North Romeral, Murindo and Salinas Faults), whereas south of this latitude right lateral displacement dominates (South Romeral and Algeciras Faults). Displacement of transpressive systems as Garrapatas, Cucuana and Ibagué faults is also facilitated by this stress regime.

Key words: inversion, factor shape of tensor, stress regime, partitioning, Andes of the North.

¹ INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Diag. 53 # 34-53. Bogotá (Colombia).
Fax 0.57-1-2223764. Correo electrónico: nalejandramariat@yahoo.com; josorio@ingeomin.gov.co

INTRODUCCIÓN

El estado de esfuerzos actual de la región norte de Los Andes está controlado por la compleja interacción de las placas tectónicas Nazca, Caribe, Sur América y la microplaca de Coiba con los Bloques Andino y Choco (FIGURA 1). Para entender la complejidad tectónica actual de estos Bloques, es necesario entender el estado de esfuerzos que lo está afectando, por lo tanto, este artículo presenta la distribución espacial de los tensores de esfuerzos actuales, obtenidos a partir de la inversión de mecanismos focales de sismos mayores.

Diversos métodos de análisis poblacional de mecanismos focales fueron utilizados para obtener dichos esfuerzos, el método de inversión de esfuerzos (Reches, 1987; Reches et al., 1992) (basado en la ecuación de Bott), el método de los diedros rectos (Pegoraro, 1972; Angelier, & Mechler 1977) (geométrico - mecánico) y el método estereográfico de dispersión de los ejes P y T. Los resultados obtenidos por el método de inversión son comparados con los conseguidos por los dos métodos

restantes con el fin de confrontar las tres soluciones, y así mostrar un tensor definitivo. Finalmente se presenta el mapa de tensores de esfuerzos actuales y la distribución del factor de forma del tensor (R) de cada una de las regiones definidas para este trabajo de acuerdo con la localización hipocentral de los eventos sísmicos y por asociación con algunos rasgos tectónicos.

INVERSIONES

Para las inversiones se utilizaron los mecanismos focales de 219 sismos registrados por la Red Sismológica Mundial (NEIC – HARVARD) en un período de 41 años a partir de 1960 y con magnitudes $m_b \geq 5,0$ distribuidos entre los -4° y 12° de latitud N y los -66° y -82° de longitud W (tomados de la base de datos de mecanismos focales. INGEOMINAS, 2001). Esta zona se dividió por áreas según la localización hipocentral de los eventos sísmicos y algunas con los rasgos tectónicos más sobresalientes (FIGURA 2 y TABLA 1); esto no significa que en los sectores donde no se determinaron la sismicidad esté

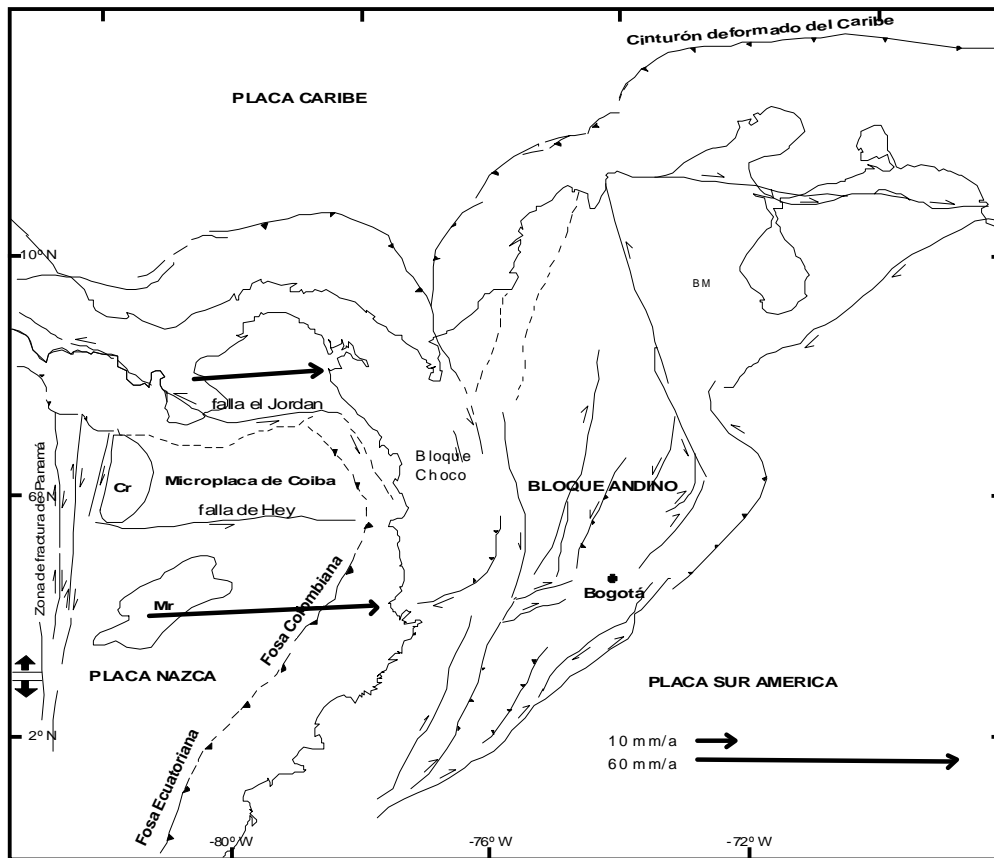


FIGURA 1. Esquema tectónico del norte de Los Andes. BM: Bloque Maracaibo. Las flechas indican los desplazamientos relativos con respecto a Suramérica (tomados de Trenkamp et al., 2002).

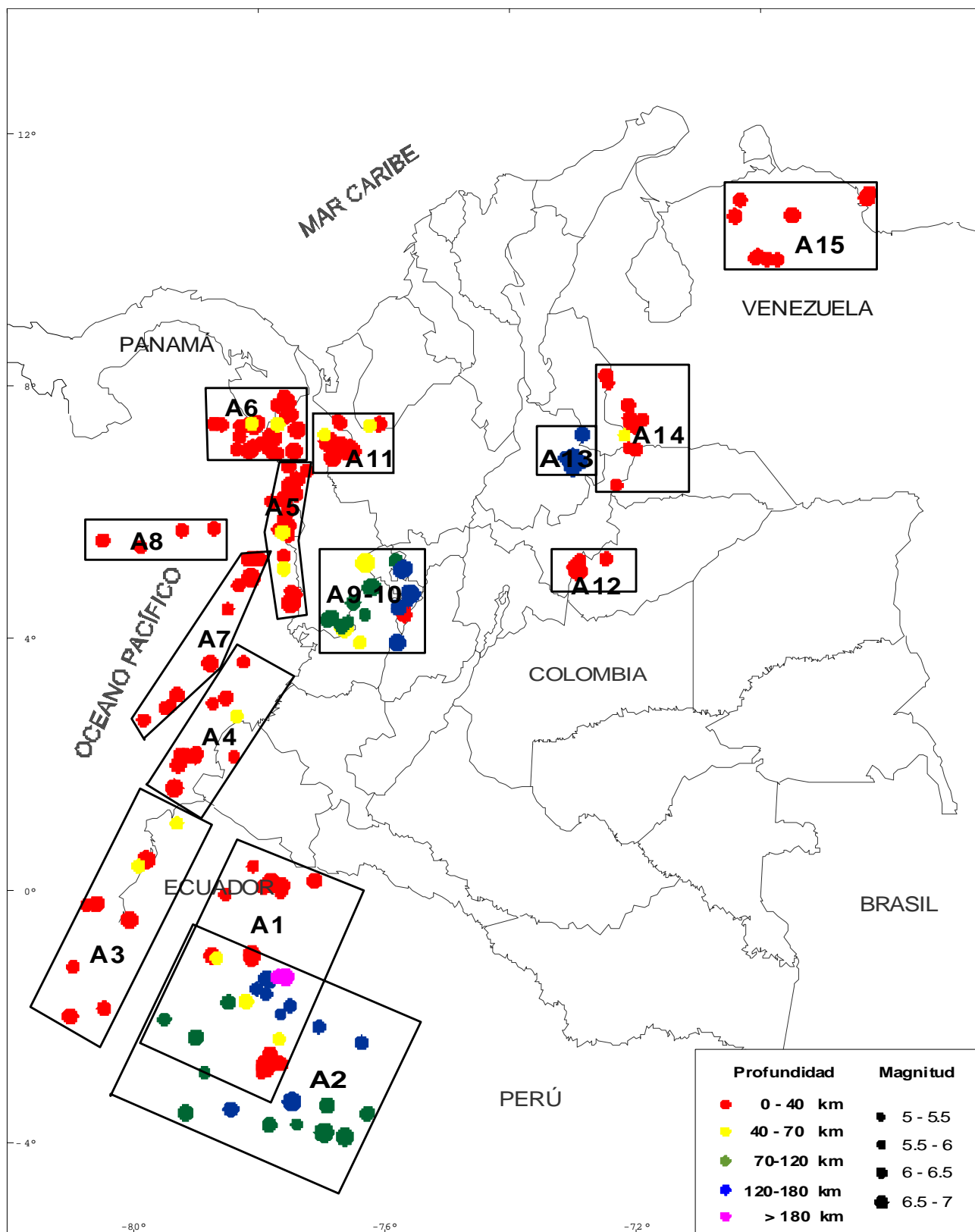


FIGURA 2. Distribución de las áreas (A) definidas a partir de la localización hipocentral de los eventos sísmicos.

TABLA 1. Localización de las áreas definidas a partir de la distribución hipocentral de los sismos.

Áreas	Número de sismos	Profundidad (km)	Localización
A1	22	Menor a 60	Ecuador (zona andina)
A2	23	Entre 87-204	Ecuador (subducción)
A3	9	Menor a 60	Costa del Ecuador al norte del golfo de Guayaquil
A4	11	Menor a 60	Costa pacífica colombiana a la altura de Tumaco
A5	23	Menor a 60	Costa Pacífica Colombiana a la altura de Bahía Solano
A6	30	Menor a 60	Límite entre Colombia y Panamá
A7	13	Menor a 40	Flexión de la placa Nazca
A8	4	Menor a 40	Falla transformante El Jordan
A9	5	Menor a 70	Eje Cafetero (zona andina)
A10	15	Entre 84 y 180	Eje Cafetero (subducción)
A11	12	Menor a 70	Murindó
A12	5	Menor a 40	Borde Llanero
A13	26	Mayor a 150	Nido de Bucaramanga
A14	11	Menor a 50	Límite entre Colombia y Venezuela
A15	10	Menor a 50	Venezuela (Falla Oca)

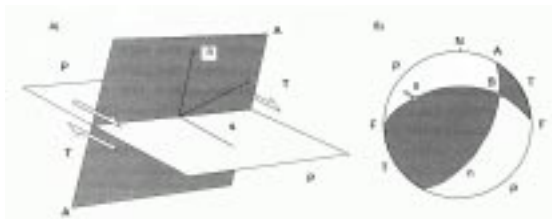


FIGURA 3. Diedros rectos y mecanismo focal de una falla. A) en perspectiva B) en proyección estereográfica (semiesfera inferior). F, plano de falla; A, plano auxiliar; n, vector unitario normal al plano de falla; s, vector unitario de deslizamiento; B, intersección de los planos F y A; P, diedro compresivo, y T, diedro extensivo. (Tomado de CSN, 1998).

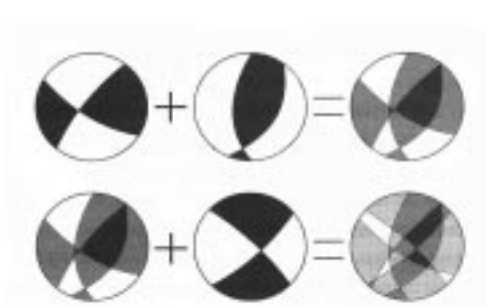


FIGURA 4. Proceso gráfico del método de los diedros rectos para dos fallas (Angelier & Mechertl, 1977). (tomado de CSN, 1998).

ausente, sino que los eventos sísmicos existentes no son suficientes para definir un área o no exceden la $m_b \geq 5,0$. Una vez las áreas fueron definidas, se procedió al cálculo del tensor de esfuerzos y el factor de forma del tensor (R) para cada una con el método de inversión de esfuerzos (basado en la ecuación de Bott y el criterio Navier-Coulomb), para esto se empleó el programa “stress”, versión 2.9 desarrollado por Reches (1996); este método permite obtener la orientación y las magnitudes relativas del tensor de esfuerzos calculado a partir de una población de fallas, y adicionalmente proporciona el coeficiente de fricción para cada tensor calculado y el factor de forma del tensor (R), basados en las siguientes premisas:

1. El deslizamiento sobre un plano de falla se produce en la dirección del máximo esfuerzo de cizalla que lo resuelve (Bott, 1959).
2. Los esfuerzos de cizalla y normales en la falla satisfacen el criterio de rotura:

$$|\tau| = \mu \sigma_n$$

donde τ y σ_n son las magnitudes de los esfuerzos de cizalla y normal en la dirección del deslizamiento, y μ es el coeficiente de fricción.

3. El deslizamiento se produce bajo condiciones relativamente uniformes: las fallas fueron activas bajo el mismo estado de esfuerzos, y la fricción en éstas se puede representar como su valor medio.

Para evaluar la calidad de la solución, Reches et al. (1992) aplican dos tipos de desviaciones angulares que están representadas por dos ángulos de dispersión diferentes, PMA (Ángulo de desviación de los ejes principales) y SM (Desviación angular de deslizamiento). El PMA es el valor de la diferencia de los esfuerzos ($\sigma_1 - \sigma_3$), el cual es mínimo sólo para una orientación del tensor de esfuerzos, este tensor que hace mínima la diferencia se denomina tensor ideal. Y el SM es el ángulo medio entre

el eje de deslizamiento observado y el eje de deslizamiento calculado de todas las fallas.

Con el propósito de hacer un análisis comparativo de estos resultados, se emplearon dos métodos alternos al método de inversión, el método de los diedros rectos y el método estereográfico de dispersión de los ejes P y T. El método geométrico – mecánico de los diedros rectos, aplicable de forma directa tanto a fallas como a mecanismos focales de terremotos, consiste en limitar para cada falla las zonas del espacio compatibles en compresión y extensión, con la superposición de estos campos en proyección estereográfica. Cada plano de falla y su estría sirven para dividir el espacio en cuatro cuadrantes, siendo los planos que los limitan el plano de falla y el otro auxiliar normal a él y cuyo polo es la estría. De este modo quedan definidos, sin ninguna ambigüedad, y teniendo en cuenta el sentido de movimiento de la falla, los dos diedros rectos opuestos dos a dos (en extensión, T y en compresión, P) (FIGURA 3).

Dado que el eje σ_1 se encuentra situado en el diedro compresivo (P) y σ_3 en el extensivo (T), cuando un conjunto de fallas han sido activas bajo el mismo régimen de esfuerzos, los dos ejes principales de esfuerzos máximo y mínimo deben estar incluidos en el mismo diedro para todos los mecanismos focales correspondientes a las fallas (FIGURA 4).

El segundo método usado para comparación de los resultados fue el método estereográfico dispersión de los ejes P y T. Si un conjunto de fallas han sido activadas bajo el mismo régimen de esfuerzos, se puede asociar la distribución de los ejes P y T de una familia de mecanismos con la posición del esfuerzo compresivo σ_1 y distensivo

σ_3 , respectivamente. Es importante anotar que en ningún momento la dirección de los esfuerzos σ_1 y σ_3 queda establecida, ya que tienen una correspondencia directa sólo cuando se tiene cizalla pura.

RESULTADOS

La mayoría de los eventos sísmicos utilizados para el trabajo se localizan en la zona de interacción de la placa Nazca y la margen de Sur América, y su concentración disminuye hacia el interior del continente en dirección a la Cordillera Oriental. Con el objetivo de visualizar la dispersión de los mecanismos focales de los sismos asociados a cada área, se construyeron los diagramas ternarios con el programa “*Rake*”, el cual utiliza para la construcción de los triángulos el valor del ángulo de inclinación (buzamiento) de los ejes P, B, y T asociados a los tipos de movimientos puros (inverso, de rumbo y normal, respectivamente); en la TABLA 2 se puede observar que, en general, más del 60% de los sismos de cada área pertenecen a un tipo de mecanismos, con excepción de los correspondientes a las áreas 9 y 11.

Método de inversión de esfuerzos

Para el cálculo de los tensores de esfuerzos, se seleccionó uno de los planos nodales de cada mecanismo focal como plano de falla, bajo dos criterios:

- Por asociación con la dirección de las principales estructuras presentes en cada área.
- Mediante los valores de desviación angular PMA y SM obtenidos con el programa “*stress*”.

TABLA 2. Tipo y porcentaje de mecanismo predominante en cada área dado en relación con el número total de sismos.

Áreas	Número de sismos	Tipos de mecanismos			
		Rumbo (%)	Normal (%)	Inverso (%)	Mixto (%)
A1	22	13,64		68,18	18,18
A2	23	4,35	95,65		
A3	9	11,11		77,78	11,11
A4	11		9,09	72,73	18,18
A5	23	21,74	4,35	73,91	
A6	30	23,33		70	6,67
A7	13		69,23	15,38	15,38
A8	4	75		25	
A9	4	50		25	25
A10	15		40	33,33	26,67
A11	12	58,33	8,33	25	8,33
A12	5	20		80	
A13	26	7,69	7,69	61,53	23,07
A14	11	18,18		81,82	
A15	10	90		10	

TABLA 3. Resultados obtenidos por el método de inversión de esfuerzos.

Áreas	Número de fallas	fricción (ϕ)	RMS	Esfuerzos			PMA	SM	Factor de forma (R)	σ vertical	Régimen de esfuerzo
				σ_1 Az/Buz	σ_2 Az/Buz	σ_3 Az/Buz					
A1	22	0.3	9.15	92/7	184/12	332/74	23,06	15,97	0,15	σ_3	Compresivo
A2	23	0.3	3.96	324/83	153/6	63/1	19,36	9,0	0,17	σ_1	Extensivo
A3	9	0.5	3.9	278/8	185/19	31/68	12,08	4,51	0,20	σ_3	Compresivo
A4	11	0.4	9.65	302/14	205/26	57/59	27,13	11,55	0,48	σ_3	Compresivo
A5	23	0.5	10.29	264/22	355/2	91/67	14,83	9,77	0,36	σ_3	Compresivo
A6	30	0.5	14.53	259/13	169/1	78/76	14,09	12,79	0,11	σ_3	Compresivo
A7	13	0.4	4.15	319/87	168/2	78/1	21,52	10,42	0,11	σ_1	Extensivo
A8	4	0.3	10.22	64/9	161/37	321/51	34,16	18,61	0,29	σ_2	Desgarre
A9	5	0.5	4.03	348/3	241/77	79/11	25,25	7,37	0,45	σ_2	Desgarre
A10 ^a	8	0.3	1.46	295/70	29/1	120/19	10,74	3,92	0,50	σ_1	Extensivo
A10b	7	0.5	0.20	145/8	239/26	38/61	38,81	31,48	0,32	σ_3	Compresivo
A10t	13	0.1	1.23	255/45	06/19	112/37	21,94	3,88	0,81	σ_1	Extensivo
A11	12	0.4	15.16	143/34	312/55	50/5	36,83	38,43	0,60	σ_2	Desgarre
A12	5	0.3	1.45	118/8	25/18	232/69	9,10	1,31	0,06	σ_3	Compresivo
A13	26	0.3	11.14	98/2	189/27	4/62	27,93	20,34	0,44	σ_3	Compresivo
A14	11	0.5	12.78	92/24	183/1	275/65	22,80	11,68	0,55	σ_3	Compresivo
A15	10	0.4	11.23	307/2	76/85	217/3	23,05	16,81	0,41	σ_2	Desgarre

Con el fin de establecer los valores de coeficiente de fricción más apropiados para las inversiones, se corrió el programa para cada área introduciendo los planos de fallas seleccionados a través de los diferentes coeficientes de fricción. Los resultados de las iteraciones se relacionaron con el valor de *rms* (error cuadrático medio) que arroja para evaluar la calidad del tensor calculado para cada uno de los coeficientes de fricción, de esta forma se tomaron los valores de fricción desde 0,1 hasta 0,6 sin considerar

el valor de fricción de 0 debido a que no es una condición natural, ni los valores superiores a 6 debido a que éstos presentan *rms* muy altos. Una vez establecidos los valores de fricción, se corrió por segunda vez el programa para obtener los tensores de esfuerzos actuales para las áreas definidas teniendo en cuenta los criterios de selección (PMA y SM) que sigue el programa "stress". Los resultados de las inversiones fueron analizados con el diagrama de deformación de Philip (1987) (TABLA 3 y FIGURA 5).

TABLA 4. Resultados obtenidos por el método de los diedros rectos.

Áreas	Número de mecanismos	Esfuerzos			σ vertical
		σ_1 Az/Buz	σ_2 Az/Buz	σ_3 Az/Buz	
A1	22	96/1	6/0	265/89	σ_3
A2	23	219/78	331/4	62/11	σ_1
A3	9	276/18	183/7	73/70	σ_3
A4	11	294/18	201/9	86/70	σ_3
A5	23	269/22	177/4	77/68	σ_3
A6	30	252/14	343/3	83/76	σ_3
A7	13	92/66	356/3	265/24	σ_1
A8	4	41/00	134/83	311/7	σ_2
A9	5	323/35	167/53	61/12	σ_2
A10 a	6	358/3	268/6	112/84	σ_1
A10 b	7	308/61	216/1	125/29	σ_3
A10	13	344/36	233/26	117/43	σ_1
A11	12	318/6	86/81	228/7	σ_2
A12	12	123/6	213/3	328/83	σ_3
A13	26	257/5	165/16	3/73	σ_3
A14	11	89/9	180/4	294/80	σ_3
A15	10	318/15	145/75	48/2	σ_2

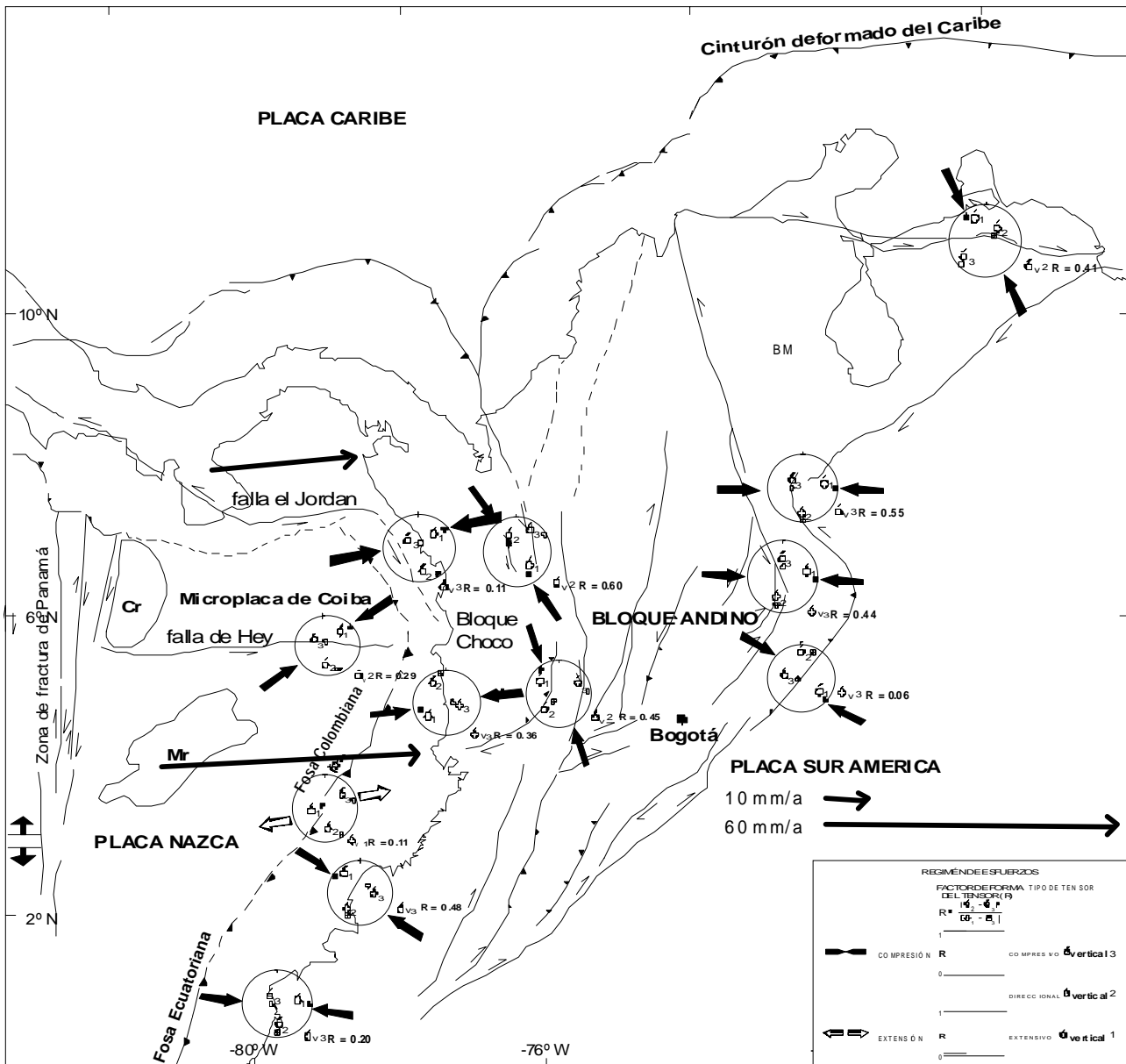


FIGURA 5. Distribución de los tensores de esfuerzos actuales regionales.

Métodos de los diedros rectos y estereográfico de dispersión de los ejes P y T.

Los resultados de estos dos métodos se aproximan a los conseguidos por el método de inversión de esfuerzos. Las direcciones de los esfuerzos principales obtenidas por el método de los diedros rectos son muy cercanas a las conseguidas por el método de inversión (TABLA 4). El método estereográfico de dispersión de los ejes P y T muestra que las mayores dispersiones medidas con el cono de confianza (indica el porcentaje de los datos que resuelve) están relacionadas a las áreas con el mayor

número de mecanismos (área 6 y área 13) y, de manera contraria, las menores dispersiones con las áreas que poseen menor número de datos (área 8 y área 9). Los conos de confianza más altos son para el eje P y los menores para el eje T, asociados con el esfuerzo máximo y mínimo, respectivamente (TABLA 5).

DISCUSIÓN

Fuentes sísmicas superficiales relacionadas a la interacción entre la placa Nazca y Sur Americana

TABLA 5. Resultados del método estereográfico de dispersión de los ejes P y T. El cono de confianza hace referencia al porcentaje de datos que resuelve en relación con el valor total.

Áreas	Eje P	Eje B	Eje T	Cono de confianza (R) en %		
				Eje P	Eje B	Eje T
A1	92/02	355/08	184/84	71	55	53
A2	220/78	144/03	59/10	80	70	75
A3	274/20	183/14	57/72	72	72	78
A4	288/25	188/09	101/77	64	48	62
A5	261/26	167/5	64/62	56	49	57
A6	290/18	175/22	9/10	14	48	32
A7	109/72	28/01	281/38	58	39	35
A8	38/01	249/82	134/06	93	56	57
A9	320/36	179/50	69/13	84	70	78
A10a	04/10	240/17	64/82	59	25	71
A10b	308/61	215/02	125/29	95	96	97
A10t	341/44	224/07	119/53	52	59	63
A11	318/14	79/64	231/08	75	52	62
A12	121/07	211/07	342/82	92	86	79
A13	256/14	154/25	331/74	33	36	47
A14	90/08	182/22	332/71	71	53	68
A15	323/14	212/74	056/14	75	73	57

(zona de acople). A lo largo de la fosa Colombo - Ecuatoriana el régimen de esfuerzos compresivo es resultado de la convergencia entre las placas Nazca y la margen de Sur América, al sur de 1° de latitud N, en la fosa Ecuatoriana, el esfuerzo máximo conserva la dirección del vector de desplazamiento de la convergencia de la placa Nazca (aproximadamente en dirección W-E).

Al norte del 1° latitud N, la convergencia oblicua entre las placas Nazca y la margen Suramericana ocasiona que el vector de desplazamiento de la convergencia oblicua de la placa Nazca se descomponga en dos vectores con relación a la dirección de la fosa, el primero ortogonal a la margen (vector de deformación), y el segundo paralelo a la margen (vector de desplazamiento). Estos vectores son transferidos desde la zona de acople al interior del continente como producto de la partición del esfuerzo (FIGURA 6).

Fuentes sísmicas superficiales asociadas a deformación cortical. Estas fuentes están relacionadas con los principales sistemas de falla paralelos a la dirección axial de Los Andes, cuyo movimiento actual es resultado de la relación entre la geometría de cada segmento y la dirección del esfuerzo máximo dado por el estado de esfuerzos actual, el cual es transferido desde la zona de acople. En el Ecuador esta relación favorece la reactivación de los sistemas de fallas inversas y transcurrentes de dirección NNE. En tanto en Colombia al sur, se ven favorecidas las fallas laterales derechas como algunos segmentos asociados al sistema Romeral sur, y fallas como Algeciras y Altamira, y al norte, algunos segmentos asociados al sistema Romeral norte, y fallas como Salinas

y Murindó laterales izquierdas. Este régimen de esfuerzos también facilita la generación de sistemas transpresivos de dirección NEE como las fallas Garrapatas, Cucuana e Ibagué entre otras.

En las regiones del Eje Cafetero y Murindó, el régimen direccional obtenido es consecuencia de la colisión del Bloque Chocó en dirección sureste con respecto al noroccidente de Suramérica (Duque-Caro, 1990), sumado a la transferencia del vector de desplazamiento de la convergencia de la placa Nazca desde la zona de acople, que facilita el movimiento lateral izquierdo de las fallas en estas regiones.

Estas observaciones se sustentan en las observaciones hechas por Trenkamp et al. (2002), quienes a partir de mediciones de GPS hacen una interpretación tectónica donde sugieren que la velocidad de la placa Nazca está siendo transferida directamente a la placa continental sur de 2°N, y que entre 2°N hasta aproximadamente 6°N la componente norte de los vectores de velocidad sugieren que la componente oblicua de la subducción de la placa Nazca está siendo acomodada por movimientos transpresivos a lo largo de las fallas subparalelas a la margen de Los Andes. Lo que está acorde con lo expuesto en este artículo.

En las áreas 12 y 14 predomina un régimen compresivo asociado con el sistema inverso del piedemonte oriental de la Cordillera Oriental. Este régimen puede estar asociado con el cambio en la dirección de las estructuras mayores de noreste a noroeste y nuevamente noreste relacionadas con falla laterales derechas al sur y con fallas laterales izquierdas al norte, respectivamente.

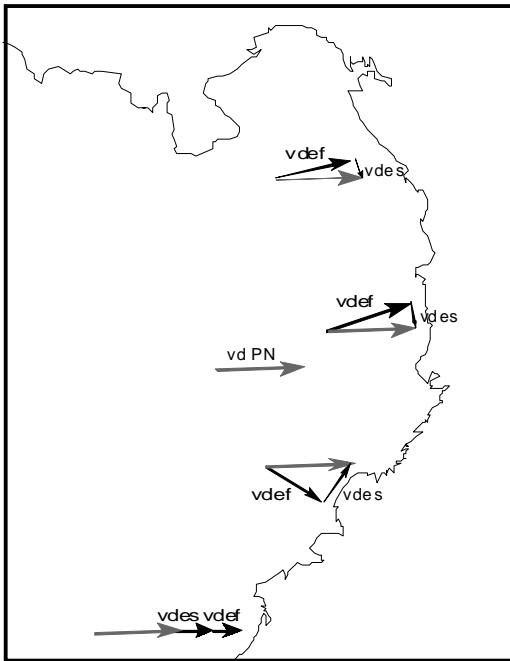


FIGURA 6. Esquema en el cual el vector de desplazamiento de la placa Nazca es particionado en el límite entre las placas. Vd PN Vector de desplazamiento de la placa Nazca. Vdef: vector de deformación. Vdes: vector de desplazamiento.

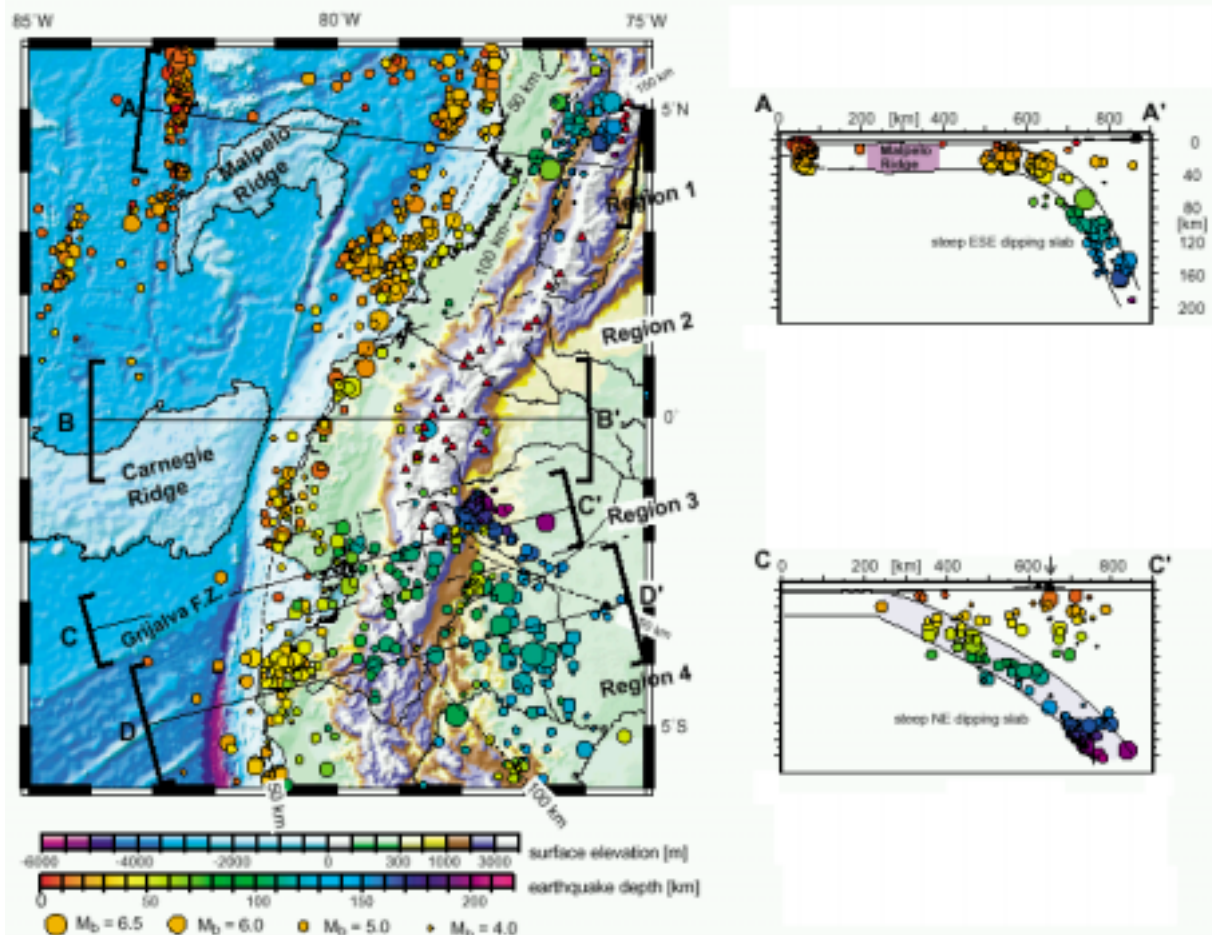


FIGURA 7. Sismicidad de la margen nor-andina. (Tomada de Gutscher et al., 1999).

En la región noreste de Venezuela, el régimen de esfuerzos de desgarre con el máximo esfuerzo en dirección NW es producto de la interacción de la placa Caribe y el bloque Maracaibo que la está cabalgando, cuyo movimiento es absorbido por los principales sistemas de fallas rumbo - deslizantes (Boconó y Santa Marta - Bucaramanga). Esta dirección del máximo esfuerzo es coherente con los resultados presentado por Audemard & Audemard (2001), quienes muestran que la trayectoria del esfuerzo principal tiene una orientación NNW-SSE en el norte de Venezuela.

Fuentes sísmicas superficiales asociadas a deformación en la corteza oceánica. En la falla transformante El Jordan, el régimen direccional encontrado es consecuente con la convergencia de la placa de Cocos bajo Centro América en dirección este-noreste, producto de la combinación de los movimientos de la dorsal mesopacífica y el *hot spot* de Galápagos. También se destaca una zona de régimen extensional paralela a la costa a la altura de Buenaventura, probablemente relacionada con la flexión que sufre la placa Nazca cuando subduce.

Fuentes sísmicas profundas asociadas a subducción. La sismicidad analizada en este trabajo muestra dos fuentes profundadas relacionadas con la subducción, la primera ubicada a la altura del Eje Cafetero en Colombia y la segunda al sur del Ecuador. La fuente de sismos profundos en la región del Eje Cafetero se encuentra relacionada con el proceso de subducción de la placa Nazca; allí se destaca la presencia de dos fuentes sísmicas: la primera, entre 84 y 116 km de profundidad asociada a mecanismos inversos (régimen compresivo), y la segunda, entre 116 y 180 km de profundidad asociada a mecanismos normales (régimen extensivo), ubicada al este de la primera. Es probable que este cambio en el régimen sugiera un leve cambio en la inclinación en la placa que subduce, aunque para esta fuente, en general, predomina el régimen de tipo extensivo. Estas observaciones difieren de las realizadas en la región del Ecuador, donde la sismicidad asociada a la subducción de la placa Nazca se relaciona con mecanismos normales (régimen extensivo) concentrados a una profundidad promedio de 180 km. Gutscher et al. (1999), en el modelo que presentan para la zona de subducción a lo largo de la costa pacífica de Sur América, muestran que la subducción de la placa Nazca no es homogénea. En los perfiles A y C (FIGURA 7) que presenta, correspondientes con las regiones del Eje Cafetero y el sur del Ecuador, se observa que la placa Nazca que está subduciendo presenta una mayor ángulo de buzamiento en el Eje Cafetero que en el Ecuador. Los resultados obtenidos están en concordancia con lo

expuesto por Gutscher et al. (1999), sin embargo, el régimen compresivo en la zona del Eje Cafetero sugiere un cambio en la geometría de la placa que subduce.

Otras fuentes sísmicas profundas. La fuente sísmica profunda de la región de Bucaramanga ha sido uno de los principales problemas a nivel de la sismotectónica en Colombia, varios autores han querido explicar su origen a partir de diversos modelos. Taboada et al. (2000) han sugerido que la sismicidad del nido es coherente con la subducción de la placa Caribe debajo de la Suramericana y que puede corresponder con una zona de inflexión o una zona de "bisagra" en la placa oceánica; otros autores como Van der Hils & Mann (1994) propone que los sismos del Nido de Bucaramanga son producidos por fusión parcial acompañados por ascenso de magma acompañado por la formación de un arco volcánico, sin embargo, no descartan la posibilidad de que el nido es producto de un complejo campo de esfuerzos cerca al contacto entre las placas de Maracaibo y el Nido de Bucaramanga en el manto superior.

El régimen compresivo obtenido para esta área, comparados con los obtenidos en las zonas de subducción de Ecuador y el Eje Cafetero, resulta contradictorio, ya que para estas zonas se imponen los esfuerzos de tipo extensivo relacionados con la tracción del manto, lo que no se ajusta a las interpretaciones en las que se considera el Nido de Bucaramanga como una manifestación de la subducción de la placa Caribe bajo la Suramericana en Colombia. Los valores obtenidos tampoco soportarían la idea de un régimen volcánico donde se espera un régimen igualmente extensivo.

CONCLUSIONES

El estado de esfuerzos en el noroccidente de Suramérica es resultado de la compleja interacción entre las placas Nazca, Sur América y Caribe, la microplacas Coiba y los Bloques Andino y Chocó. Esta región está sometida a un estado de esfuerzos compresivo producto de la convergencia oblicua entre las placas Nazca y la margen de Sur América, donde el vector de convergencia de la placa Nazca se particiona de acuerdo a su relación geométrica con la dirección de la fosa, originando tensores de esfuerzo que regionalmente varían según esta relación. La transferencia de estos esfuerzos al continente ocasiona la reactivación diferencial de los sistemas de fallas paralelos a los Andes, expresando en términos generales un dominio transpresivo.

La distribución de la sismicidad en la región permite identificar que estos eventos están relacionados con diferentes procesos: interacción de las placas tectónicas, subducción, fallamiento cortical y el nido sísmico de Bucaramanga.

A lo largo del noroccidente de Suramérica, la concentración de la sismicidad varía de acuerdo con su origen así:

Entre 4° S y 1° N la sismicidad superficial está asociada con la zona de acople entre las placas Nazca y Sur Americana y con la deformación cortical; y la sismicidad profunda esta relacionada con el proceso de subducción de la placa Nazca.

Entre 1° N y 4° N la sismicidad superficial está relacionada con la zona de acople entre las placas Nazca y Sur Americana y la sismicidad intermedia y profunda es dispersa.

Entre 4° N y aproximadamente 6° N la sismicidad superficial está relacionada con la zona de acople entre las placas Nazca y Sur Americana y con la deformación cortical; y la sismicidad profunda esta relacionada con la subducción de la placa Nazca.

Entre aproximadamente 6° N y 8° N la sismicidad superficial está asociada con la zona de acople entre las placas Nazca y Sur Americana y con la deformación cortical. La presencia de la microplaca Coiba en esta región probablemente ocasiona que el proceso de subducción sea incipiente o no este muy desarrollado.

El ángulo de subducción de la placa Nazca parece variar a lo largo de la zona de estudio, al sur, en el Ecuador, la sismicidad asociada a este proceso se concentra a mayor profundidad que la observada a la altura del Eje Cafetero en Colombia donde, además, se presentan dos fuentes a diferentes profundidades igualmente relacionadas con la subducción; ambas regiones presentan un proceso distensivo.

Los resultados obtenidos para la región del Nido de Bucaramanga comparados con los resultados de las fuentes profundas del Eje Cafetero y el Ecuador, permite pensar que esta región no constituye un modelo clásico de subducción.

La ausencia de sismicidad profunda (>100 Km) al norte de 6° N parece indicar que la presencia de la microplaca de Coiba, limitada por la zona de fractura de Panamá al este y por las fallas transformantes El Jordan y Hey repercute de forma directa en una clara reducción de la

velocidad de subducción de la placa Nazca, ocasionando que el proceso de subducción a esta altura este poco desarrollado y la mayor parte de la deformación esté asociada con actividad sísmica superficial en la zona de acople.

REFERENCIAS

Angelier, J., Mechler, P. (1977). Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en seismologie: la methode des diedres droites. Bull. Soc. Geol. France, Vol. 7 (19), pp. 1309-1318.

Audemard F., Audemard F. (2001). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the south America-Caribbean geodynamic interaction. Tectonophysics, No. 6509, pp. 1-25.

Bott, M.H.P. (1959). The mechanism of oblique-slip faulting. Geol. Mag., Vol 96, pp.109-117.

Consejo de Seguridad Nacional de España. (1998). Proyecto SIGMA: Análisis del estado de esfuerzos tectónicos, reciente y actual en la Península Ibérica. Madrid: CSN. 239 p.

Duque-Caro H. (1990). El Bloque Chocó en el Noroccidente Suramericano: Implicaciones estructurales, tectonoestratigráficas y paleográficas. Bol. Geol. Ingeominas. Vol. 31, No. 1, pp. 50-71.

Gutscher, M.-A., Malavieille J., Lallemand S., Collot J.-Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. Earth and Planetary Science Letters, pp. 255-270.

INGEOMINAS. (2001). Base de datos de Mecanismos focales de Colombia.

Pegoraro, O. (1972). Application de la microtectonique á un étude de neotectonique. Le golfe Maliaque. Thèse IIIème cycle. U.S.T.L. Montpellier. 41.

Philip H. (1987). Plio-quaternary evolution of the stress field in Mediterranean zones of subduction and collision. Annales Geophysicae. Vol. 3, No. 5B, pp. 301-320.

Reches, Z. (1987). Determination of tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield conditio. Tectonics. Vol. 7, pp. 849-861.

Reches, Z., Baer, G., Hatzor, Y. (1992). Constraints on the strength of the Upper Crust from stress inversion of fault slip data. J. Geophys. Res., Vol 97, pp.12481-12493.

Reches, Z. (1996). Inversion of fault slip data and focal-plane solutions. Software *Stress* versión 2.9.

Taboada A., Rivera L., Fuenzalida A., Cisternas A., Philip H., Bijwaard H., Olaya J., Rivera C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). en: Tectonics. Vol. 19, No. 5. pp. 787-813.

Trenkamp R., Kellogg J., Freymueller J., Mora H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America; CASA GPS observations. Journal of South American Earth Sciences. Vol. 15, No. 2, pp. 157-171.

Van der Hils R., Mann P. (1994). Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. En: Geology. Vol. 22, pp. 451-454.

Trabajo recibido: julio 16 de 2004

Trabajo aceptado: septiembre 6 de 2004